

定域長期観測用シャトルビークル「ツクヨミ」の概要

正 員 浅 川 賢 一^{*1}
渡 辺 佳 孝^{*1}
中 野 善 之^{*1}
伊 藤 譲^{*4}

正 員 百 留 忠 洋^{*1}
小 林 大 洋^{*2}
正 員 中 村 昌 彦^{*3}
小 島 淳 一^{*5}

Outline of Underwater Shuttle Vehicle “Tsukuyomi”

by Kenichi Asakawa, *Member*
Yoshitaka Watanabe
Yoshiyuki Nakano
Yuzuru Ito

Tadahiro Hyakudome, *Member*
Taiyo Kobayashi
Masahiko Nakamura, *Member*
Junichi Kojima

Key Words: Virtual Mooring, Shuttle Vehicle, Underwater Glider, Tsukuyomi

1. 緒 言

海洋環境変動予測の精度を高めるためには、長期的な連続観測を様々な海域で行うことが必要である。このような観測は、これまで主にプロファイリングフロートやブイを用いて行われてきた。国際プロジェクトであるアルゴ計画では現在約3200台のアルゴフロートを世界中に展開して、そのデータをホームページで世界中に航海している。アルゴフロートは、海洋学にブレイクスルーをもたらしたと言われている。

しかし海洋は広大であり、現状で十分な観測データが得られているとは言い難い。さらに充実した観測データを取得するためには、大量の観測機器を展開するという手法から脱却して、極域周辺海域など海洋環境変動の影響が早期に顕著に現れる海域など、観測が重要なキーとなる海域において、長期間に亘り、連続的な観測をリアルタイムで行うことが重要である。また、妥当なコストで観測を継続することも重要である。

このような観点から現状技術を見ると、フロートは海の流れに乗って移動するために、一定地点に留まって長期的な観測を行うことができない。つまり、データが必要な海域に長期に亘って留まり、観測を継続することができない。ブイシステムは定点における長期観測を行っているが、設置にはその設計から投入まで多大な労力と費用が必要となる上、観測点の変更は困難である。

このような課題に対応するため、筆者等は水中グライダーを利用したバーチャルモアリングを提案し¹⁾²⁾、長期間にわたり一定海域で観測が行える3,000m級シャトルビークル「ツクヨミ」の開発に着手した。ツクヨミはフロートと同様に浮力エンジンにより浮力を制御して海中を沈降・浮上する（Fig. 1）。同時に翼を利用して海中を滑空して、その位置を制御する。姿勢の制御は、内蔵の電

池と重りを動かし、重心位置を変えることにより行う。海面に浮上したときには、GPSで位置を測定するとともに、イリジウム経由で陸上局と通信する。フロートと同様に海中または海底でスリープすることにより、観測期間を拡大する。海底に音響基地局を置くことができれば、海中でもその位置を知ることができ、海氷で海面が覆われて浮上が困難な場合でも、連続的な観測を継続することができるようになる。

本論文ではツクヨミの構造、第1回海洋試験結果など、現状の開発状況を報告する。なお、曳航水槽において実機を用いて実施された直進滑空試験、旋回滑空試験については、本講演会の「シャトルビークル「ツクヨミ」の水槽滑空試験」³⁾で報告する。

2. ツクヨミの構造

ツクヨミの構造を Fig. 2 に、外観を Fig. 3 に示す。ツクヨミの空中重量と最大潜水深度はそれぞれ約150kgと3,000mである。本体の耐压容器はアルミ合金で、翼と前後のフェアリングはそれぞれFRPとポリエチレンで作られている。翼の形状は小型模型を用いた流体力学的試験⁴⁾により決定した。

浮力エンジンは、ピストンポンプ方式のもので、4,000m水深のフロート Deep NINJA⁵⁾ 用に開発したものをベースにしている。最大適応水圧は40MPa、シリンダ容量は50 cm³、1 サイクルに要する時間は約5分（オイル押し出

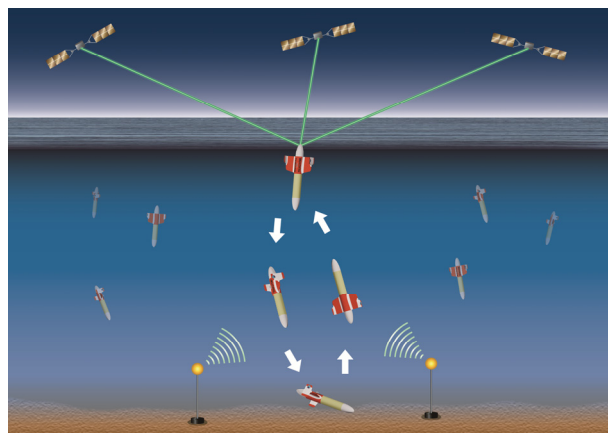


Fig. 1 Operation image of Tsukuyomi^{1), 2)}

*1 海洋研究開発機構・海洋工学センター

*2 海洋研究開発機構・地球環境変動領域

*3 九州大学応用力学研究所

*4 株式会社海洋工学研究所

*5 株式会社 KDDI 研究所

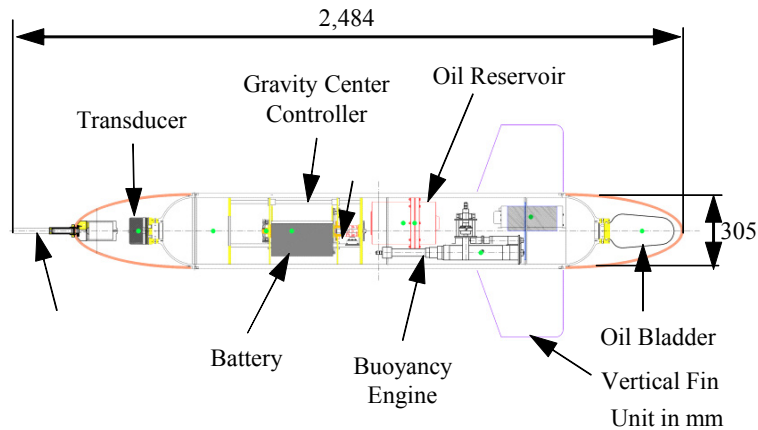


Fig. 2 General arrangement of Tsukuyomi

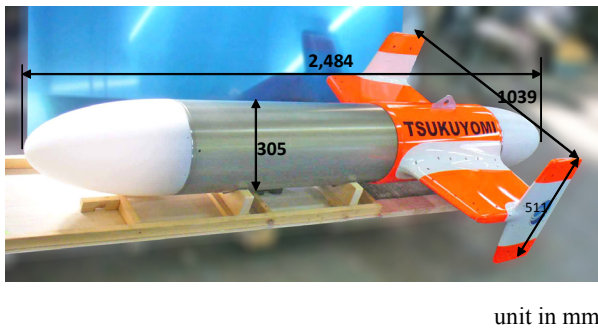


Fig. 3 Photo of Tsukuyomi

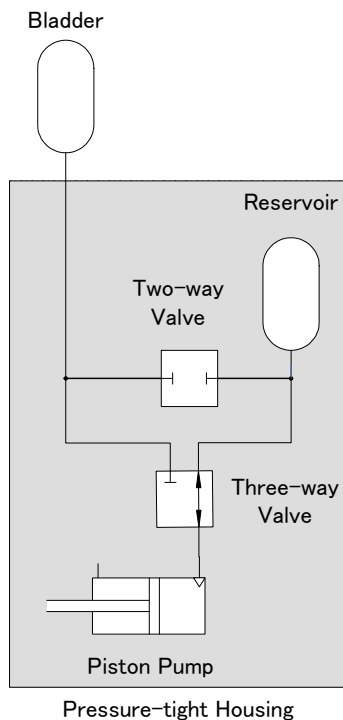


Fig. 4 Basic hydraulic circuit of the buoyancy

し時) / 7 分 (オイル引き込み時) である。油圧回路を Fig. 4²⁾ に示す。耐圧容器内部は 0.5 気圧程度に減圧している。油を引き込むときには、Alace⁶⁾ と同様に、耐圧容器

内外の圧力差を利用し、2 方弁を介して油を引き込む。ピストンポンプを介さずに油を引き込むことにより、短時間で浮力を減少させ潜水速度を増加させることが可能となる。また、油の引き込みに要する電力を低減することもできる。

オイルリザーバには、Seaglider⁷⁾ と同様にペロフラム社のローリングダイアフラムを利用した。容量は 2.5 リッターで、リニアポテンショメータにより油量を計測できるようにした。耐圧容器外に配置されるブラダの容量も 2.5 リッターである。

電池はニッケル水素 2 次電池を搭載している。定格容量は 24V×20AH である。リチウム 1 次電池に交換することにより、電力容量を増加することができる。電池は、重心移動装置の移動部分に搭載している。縦方向の移動範囲は±75 mm、回転角度は±90° である。この重心移動により、静的なピッチ角とロール角はともに±60° の範囲で動かすことができる³⁾。重心移動装置の駆動にはパルスモータ (CoolMuscle) を用いている。

水中での位置を母船から測定できるようにツクヨミには超音波トランスポンダが搭載されている。周波数帯域は、10kHz～15kHz 帯である。さらに超音波高度計を搭載する予定である。

GPS/イリジウムアンテナは、Trident 社の耐圧アンテナを使用している。

内蔵のセンサは、コンパス (OS5000)、姿勢センサ (AMU Light)、水圧計、気圧センサ、温度センサ、湿度センサなどである。また、自記式の CTD センサを搭載することができる。

電子回路系統図は参考文献⁴⁾で報告済みなので、ここでは省略する。

3. 海洋実験

開発したツクヨミの基本的動作を確認するために、水槽試験に引き続き、実際の海洋で沈降・浮上試験と海面浮上時の GPS 測位 / イリジウム通信試験を行った。実験は JAMSTEC が所有し運航する海洋調査船「かいよう」により、2012 年 3 月 1 日～5 日にかけて相模湾にておこなった。

Fig. 5 は海面に浮上して GPS 測位とイリジウム通信を行っているときのツクヨミの写真である。波高は 1.0 m



Fig. 5 Photo of Tsukuyomi floating on sea surface

～1.5 m 程度であったが、安定した GPS 測位とイリジウム通信が行えることを確認した。

今回は初めての海洋実験であるため、亡失対策として 500m の細径ロープ（スーパーコード S-20: ハヤミ工産（株））をツクヨミに接続した（Fig. 6）。細径ロープはケブラー繊維の周辺をポリエステル繊維で保護したもので、線径と破断強度はそれぞれ 2.05 mm、2.3 kN である。細径ロープは浮力を持つリール（ビニコンフロート）に巻き取り、ツクヨミが潜水するのに伴い自動的に巻出するようにした。

Fig. 7 はピッチ角を最大にして潜水したときの深度、ピッチ角、ロール角、方位の変化を示したものである。細径ロープが取り付けられているため、最大潜水深度は 430m 程度であったが、安定した滑空が行われていることが確認できる。安定滑空時の平均沈降速度、ピッチ角、ロール角はそれぞれ 0.28m/s、 -56° 、 0.3° であった。このときの推定水中重量はおよそ 0.43kg であった。ピッチ角は静的試験の結果とほぼ一致している。この沈降速度

Table 1 Results of turning tests

Number	Direction of turn	Roll-angle (deg)	Turn-speed (deg/s)
1	Left-hand	22.8	-0.14
2	Right-hand	-21.6	0.48
3	Left-hand	23.1	-0.79
4	Right-hand	-22.8	1.36

では、3 時間程度で水深 3,000m まで到達することができる。水中重量は、1kg 以上に増加することができるので、沈降速度もさらに増加することができる。細径ロープを取り外せば、さらに滑空速度が増加するものと考えられる。

Fig.8 は旋回実験結果の一例である。ロール角を変えることにより、左右の旋回方向を制御できることが確認できる。浮力エンジン動作中は、ピストンの移動によりピッチ角が変化する。安定滑空時の平均沈降速度とピッチ角はそれぞれ 0.08m/s と -4.7° であった。ロール角と旋回速度は Table 1 に示す。このときの推定水中重量はおよそ 0.43kg であった。1 回目と 3 回目、および 2 回目と 4 回目は水中重量、ロール角がほぼ同一なのに旋回速度が異なっている。その原因として、細径ロープの影響が考えられる。

4. 結語

一定の海域に長期間留まり、水深 3,000 m から海面まで定期的に往復して水温等の観測を行い、測定データを衛星経由で準リアルタイムで送信するシャトルビークル「ツクヨミ」の開発状況を報告した。今後、方位と姿勢制御機能、スリープ機能、海底着底機能などを実装して、

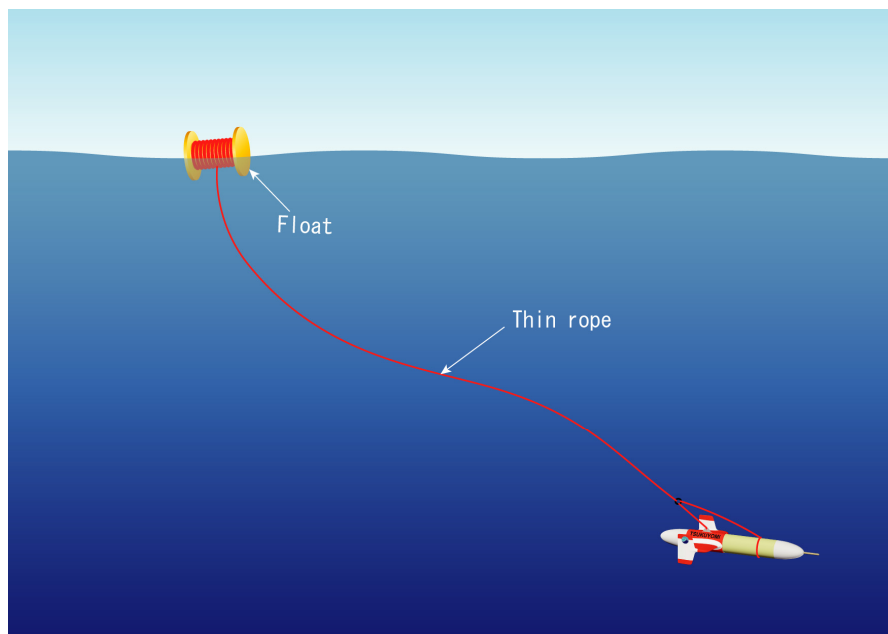


Fig. 6 Setup for the sea-test of Tsukuyomi

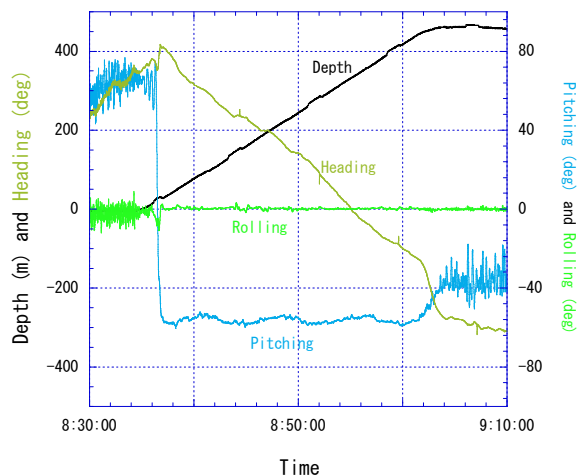


Fig. 7 An example of measured data when Tsukuyomi was descending straight.

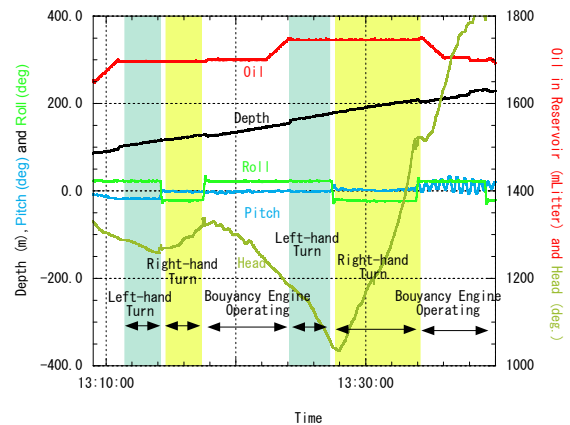


Fig. 8 Another example of measured data when Tsukuyomi was descending while changing its heel angle.

一定海域に長期間留まり観測が行えることを実証する予定である。

参考文献

- 1) 浅川賢一, 小林大洋, 百留忠洋, 渡邊佳孝, 中野善之, 河野健, 中村昌彦: 長期定域海洋観測用シャトル型ロボットの開発構想, 第 22 回海洋工学シンポジウム, OES22-025, 2011.
- 2) Kenichi Asakawa, Masahiko Nakamura, Taiyo Kobayashi, Yoshitaka Watanabe, Tadahiro Hyakudome, Yuzuru Ito, and Junichi Kojima : Design Concept of Tsukuyomi – Underwater Glider Prototype for Virtual Mooring –, in Proc. of OCEANS 2011 Santander Spain, in CD-ROM, 2011.
- 3) 中村昌彦, 浅川賢一, 百留忠洋, 松岡宏樹, 川谷哲也, 植田剛史: シャトルビークル「ツクヨミ」の水槽滑空試験, 平成 24 年日本船舶海洋工学会春季講演会論文集, 2012.
- 4) 中村昌彦, 浅川賢一, 百留忠洋: 海洋観測用シャトル型ロボットに働く流体力に関する研究, 第 22 回海洋工学シンポジウム, OES22-016, 2011.
- 5) Taiyo Kobayashi, Kenichi Asakawa, Kazuhiro Watanabe, Tetsuro Ino, Ken-ichi Amaike, Hiroshi Iwamiya, Michihiko Tachikawa, Nobuyuki Shikama and Keisuke Mizuno : New Buoyancy Engine for Autonomous Vehicles Observing Deeper Oceans, in Proc. of ISOPE 2010, pp. 401-406, 2010.
- 6) R. E. Davis, D. C. Webb, L. A. Regier and J. Dufour : The Autonomous Lagrangian Circulation Exploere (ALACE), J. of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 9, pp. 264-285, 1992.
- 7) Charles C. Eriksen, T. James Osse, Russell D. Light, Timothy Wen, Thomas W. Lehman, Peter L. Sabin, John W. Ballard, and Andrew M. Chiodi: Seaglider: A Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research, IEEE J. of Oceanic Engineering, vol. 26, no.4, pp.424-436, 2001.